표면 거칠기를 고려한 NURBS 보간기

최인휴*· 정태성*· 홍원표**· 양민양***

NURBS Interpolator for Controlling the Surface Roughness

Inhugh Choi*, Taesung Jung*, Wonpyo Hong** and Minyang Yang***

Key Words : NURBS interpolator (NURBS 보간기), PC-NC (PC 기반 수치제어기), Variable feedrate (변동 이송속도), Extended surface roughness model (확장 표면 거칠기 모델)

Abstract

Finish machining of a curved surface is often carried out by an NC system with curve interpolation in the field. This NURBS interpolation adopts a feedrate optimizing strategy based on both the geometrical information and dynamic properties. In case of a finish cut using a ball-end mill, the curve interpolator needs to take the machining process into account for more improved surface, while reducing the polishing time. In this study, the effect of low machinability at the bottom of a tool on surface roughness is also considered. A particular curve interpolation algorithm is proposed for generating feedrate commands which are able to control the roughness of a curved surface. The simulation of the machined surface by the proposed algorithm was carried out, and experimental results are presented.

1. 서 론

자유곡면 형상 가공에서 CNC 가공은 필수적이며, 이를 위하여 먼저 가공조건을 선정하고, 공구 경로를 계획한 다음, 파트 프로그램 형태로 출력된 경로를 실시간으로 보간하여 최종적으로 서보 제어를 수행하여야 한다. 공구경로의 보간은 제어기 내부에서 실시간으로 수행되며, 공구 경로 계획 단계에서 얻어진 기하학적인 정보로부터 기준 위치(또는 속도)를 매 샘플링 시간마다 생성하는 작업이다. 생성된 기준위치는 서보 제어 시스템을 구동하는 입력이 된다.

종래의 CNC 에서는 곡선 경로를 직선이나 원호 같은 간단한 엔티티로 분리하여 처리하였으나, 최근 들어 해석곡선의 정의로부터 직접 공작기계를 구동하는 직접보간 (direct interpolation)이 도입되었다. 이를 이용하면 CNC 로 전달되는 데이터량을 줄여서 통신부하를 경감시키고, 이송속도의 변동을 최소화하는 등의 장점이 있다. Yang(1-3)은 공작기계의 동특성을 고려하여 매개변수 곡선 보간에서의 운동 명령생성에 대하여 수식화를 하였다. 그러나, 제안된 방법은 고차항을 무시한 Taylor 시리즈에 기초하여 기준점 (서보제어 루프에서 요구하는 지령점)을 생성하기 때문에 근사오차를 포함하고 있는데, 이는 가공물 또는 구동계에서 윤곽오차 (contour error)와 이송속도 오차 (feedrate error)를 유발한다. 좀더 정확한 이송속도를 구현하기 위하여 Lo[4]는 피드백 보간기를 제안하였고, Yeh[5-6]는 이송속도를 보상하고, 윤곽오차를 제한할 수 있는 보간 방법을 제안하였다. 이 들 연구는 주로 공작기계 이송계의 지령의 추종성을 향상시키기 위한 방법론에 대한 것이었다. 또한, 가공 공정상의 특성을 보간 과정에서 고려하려는 연구가 진행되었는데, Lo[7]는 CC (cutter contact) 점에서의 일정 이송속도를 구현하기 위한 공구경로 생성 방법을 제안하였고, Chu[8]는 볼 엔드밀 가공에서 국부가공 형상 (local shape)에 따른 이송속도 최적화를 실험적으로 수행하였다. 특히, Farouki[9]는 특별한 매개

* 한국과학기술원 기계공학과 대학원
E-mail : s_cih2000@kaist.ac.kr
TEL : (042)869-3264 FAX : (042)869-3210
** 생산기술연구원 생산시스템 개발본부 나노가공팀
*** 한국과학기술원 기계공학과

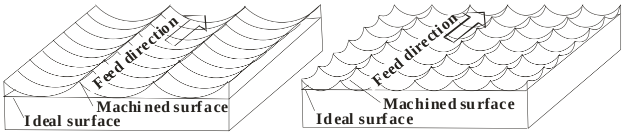
변수 곡선인 PH (Pythagorean-hodograph) 곡선에 대한 MRR (material removal rate)을 일정하게 유지하는 변동 이송속도 CNC 보간법을 제안하여 경로의 곡률 효과를 고려하고, 이를 보상하는 지능적인 보간 알고리즘을 제안하였다. MRR 은 가공 중의 절삭력을 대표하는 값으로 이를 일정하게 유지하는 것이 가공의 정밀도와 공구수명을 개선하는데 유리하다. 그러나, 최종 정삭 가공에서는 절삭깊이가 작아 가공부하인 MRR 보다는 오히려 가공면의 거칠기 요구조건이 중요하게 된다. 가공 후 표면 거칠기는 후처리 사상작업에 직접적으로 영향을 미치는 인자이므로 정삭 가공으로 원하는 표면 거칠기 수준까지 도달하는 것은 가공 능률을 향상시키는데 매우 중요하다.

볼 엔드 밀링에서 가공면의 기하학적인 표면 거칠기는 공구반경, 이송량, 경로간격 그리고 피삭면의 곡률반경에 의하여 결정된다[10]. 일반 가공 조건에서 볼 엔드밀에 의한 가공면의 거칠기는 경로간격 (path interval)에 의한 커습 (cusp) 높이가 우세하게 영향을 미치고, 커터마크 (cutter mark) 의 영향은 미미하다. 그러나, 고속가공의 경우에 미소한 가공량으로 급속히 빠른 이송을 하므로 경로간격을 작게 유지하고, 이송을 고속화한다. 이 경우에 표면의 거칠기는 이송방향의 커터마크에 의해 만들어진 높이를 무시할 수 없게 된다[11-14].

본 연구는 정삭 가공후의 가공면의 거칠기를 제어할 수 있는 특수한 곡선보간 알고리즘을 개발하는데 초점을 맞추었다. 곡선 공구 경로부터 해석적으로 얻을 수 있는 기하학적인 정보를 이용하여 전 가공표면에서 일정 표면 거칠기를 얻을 수 있는 운동 명령을 생성하는 NURBS 보간 알고리즘을 개발하고, 이를 가공면의 Z-map 모사와 가공실험을 통하여 확인 한다. 이송속도 제어를 위하여 근사된 표면 거칠기 확장 모델을 제안 NURBS 곡선 경로에 대한 가공실험을 통하여 성능을 확인한다.

2. 고속가공에서 표면 거칠기

공구의 강성과 내마모성이 증대되고 기계의 강성이 우수해짐에 따라 경로간격을 줄이고, 이송을 고속화하면서 커터마크의 높이가 표면 거칠기에 크게 영향을 미치게 되었다. 이 가공영역에서의 가공면에 나타나는 표면 형상 (topology)은 커습뿐만 아니라, 이송방향으로의 커터 마크가 커습 높이 수준으로 높게 나타나게 된다. 정삭 후 사상작업을 고려한다면 이 커터 마크가 커습 보다 높지 않게 조정할 필요가 있다. Fig.1 은 볼 엔드 밀 가공에 의한 표면 형상을 보여준 것이며, 본 연구에서는 가공시간과 사상시간 측면에서 유리한 (b) 가공면에 초점을 맞추었다.



(a) Conventional condition (b) High-feed condition

Fig. 1 Surface texture after milling

2.1 기존의 표면 거칠기 모델

자유곡면을 볼 엔드 밀로 가공한 면의 이론적인 표면 거칠기는 식 (1)과 같이 커습 높이와 커터 마크 높이의 합으로 나타낼 수 있다.

$$R_{\max} = \frac{f_f^{\,2}}{8r}\left(1 - \frac{r}{\rho_f + r}\right) + \frac{f_p^{\,2}}{8r}\left(1 - \frac{r}{\rho_p + r}\right) \qquad (1)$$

여기서, f_t 는 날당 이송량, f_p 는 픽피드량, 그리고 r 은 공구 반경을 나타낸다. 고품위 가공면을 얻으려면 픽피드를 줄여서 커습 높이를 낮추면 되지만, 동일 면적을 가공할 때 지나가는 횟수가 증가하므로 가공시간의 증가를 유발한다. 이를 보상하기 위하여 이송속도를 증가시키게 되면 커터마크가 높게 나타나게 되는데, 일반적으로 그 상한값은 커습 높이와 같게 되는 이송속도로 정해진다. 또한, 곡선 경로일지라도 이송은 매 샘플링 시간에서의 직선운동으로 나타나므로 이송방향의 곡률은 무시할 수 있다.

또한, 볼 엔드 밀은 공구 중심축 부근의 인선의 절삭속도가 이송속도보다 작은 영역이 존재하고, 이 영역에서 가공된 면에는 절삭 잔량 (cutting remains)이라는 돌출된 재료가 남아있게 되는데, 이것은 기존의 표면 거칠기 모델식인 식 (1)로는 설명할 수 없는 부분이다[13]. 이 문제를 해결하려면 5 축 가공을 이용하여 적절한 공구자세로 공구정점 부근의 인선에 의한 가공을 회피하는 방법이 있으나, 공정 계획이 복잡하고, 고비용이 든다. 결국, 3 축 고속 가공으로 공구정점 가공 영향을 최소화하기 위해서는 이를 표현할 수 있는 표면 거칠기 모델을 구하고, 이를 이용하여 역으로 이송속도를 제한하면 될 것이다.

2.2 확장 표면 거칠기 모델

볼 엔드 밀에 의한 가공 표면은 Fig.2 처럼 커습면과 커터 마크면의 중첩으로 나타낼 수 있다. 커습 면은 경로간격에 의하여 결정되는 면이고, 커터 마크 면은 날당 이송에 의하여 생성되는 면이

다. 좀더 정확한 가공 면의 형상을 얻기 위하여 공구 인선방정식에 의한 가공 면을 Z-map 형태로 얻고, R_{max}를 구한다.

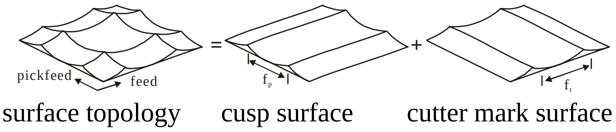
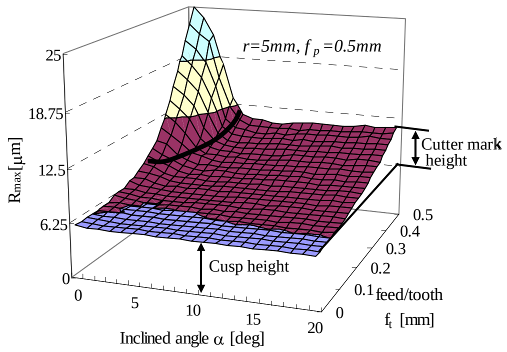
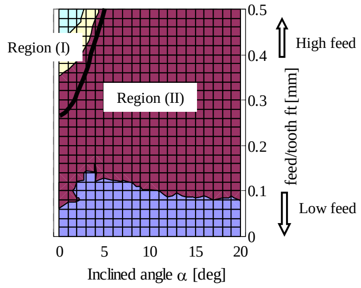


Fig. 2 Surface topology by the superposition of the component surfaces in the two directions



(a) Map of R_{max}



(b) Contour map of R_{max}

Fig. 3 Resultant surface roughness from the simulation

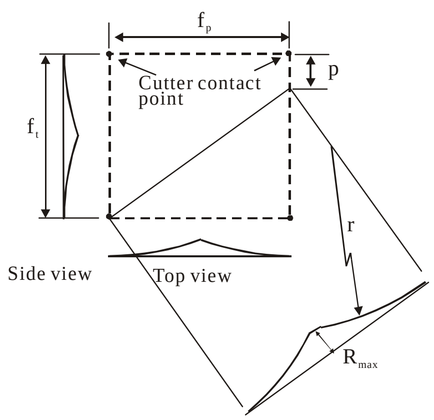


Fig. 4 Feature drawing of machined surface in the non-effect zone of dead center

Fig.3 은 공구반경 5mm, 픽피드 0.5mm/tooth 인 경우에 이송 경사각과 날당 이송을 달리했을 때의 R_{max}를 표시하였다.

여기서, (I) 영역은 공구 정점부근의 인선이 참여하여 과도한 절삭잔량을 남겨서 R_{max}가 최고 2 배가 커지는 영역이고, (II) 영역은 기존의 표면 거칠기 식으로 예측 가능한 영역이다. 실제적으로 너무 작은 날당 이송 조건은 가공시간의 증가를 유발하므로 피하여야 한다. 표면 거칠기와 가공능률 관점에서 이송경사각에 따라 최적의 가공조건은 두 영역의 경계선 및 날당 이송이 픽피드와 같은 조건을 나타내는 선이 된다.

Fig.4 는 공구 정점 부근이 가공에 참여하지 않는 (II) 영역의 R_{max}를 구하기 위하여 가공면의 특징 형상을 나타냈으며, 이로부터 R_{max}는 기존의 표면 거칠기 수식에서 절삭 날이 재료 안으로 진입하는 점과 바깥으로 진출하는 점 사이의 위상이 위상 차를 추가로 고려하면 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$R_{max}(f_t,|\alpha|>\alpha_c)=\frac{f_p^{\,2}}{8r}\cdot\left[1+\left(\frac{f_t-p}{f_p}\right)^2\right] \qquad (2)$$

여기서, $p=\frac{f_t}{\pi}\cdot\frac{f_p}{r\sin\alpha}$ 이다. 에서 f_t 사이의 범위를 가진다. 최대 거칠기는 공구경로 사이의 가운데 지점에 위치한다.

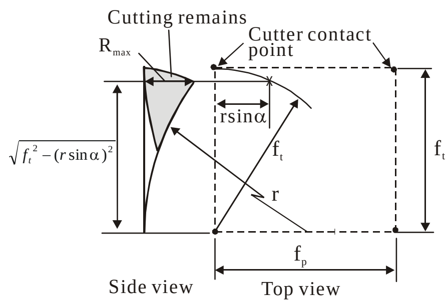


Fig. 5 Feature drawing of machined surface in the effect zone of dead center

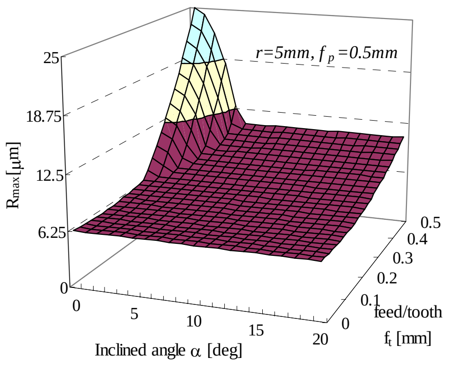
Fig.5 는 공구정점이 가공면 생성에 참여하는 않는 (I) 영역의 R_{max}를 구하기 위하여 가공면의 특징 형상을 도시한 것으로써 커습은 동일하지만, 커터 마크에는 절삭잔량에 의한 돌출이 생긴다. 따라서 최대 표면 거칠기 또한 이 돌출부에 의하여 결정된다. 이 돌출부의 위치가 공구 경로의 오른쪽에 $r\sin\alpha$ 만큼 떨어져서 위치하고, 공구는 구면을 가진다고 계산하면 표면 거칠기 식은 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$R_{max}(f_t,|\alpha|\le\alpha_c)=r\cdot\left[1-\sqrt{1-\left(\frac{f_t}{r}\right)^2+\sin^2\alpha}\right] \qquad (3)$$

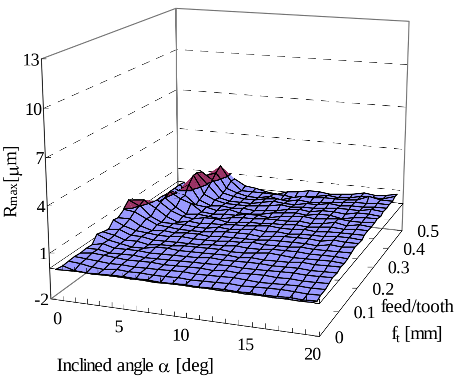
식 (3)은 공구반경이 주어졌을 때 날당 이송과 이송 경사각의 함수로 R_{max} 를 표시하고 있으며, 경사각이 영일 때 최대가 된다. 그리고 임계경사각 이내 일 때 만 적용되고 임계경사각은 경계조건으로부터 계산될 수 있다. 두 영역의 경계가 되는 임계이송경사각 α_c 는 위 두 식의 경계조건으로부터 식 (4)와 같이 구할 수 있다.

$$\alpha_c = \sin^{-1}\left(\frac{1}{r}\sqrt{\left(\frac{A}{8r}\right)^2 - \frac{A}{4} + f_t^{\,2}}\right) \qquad (4)$$

여기서, $A = f_p^{\,2} + (f_t - p)^2$ 이고, $p = \frac{f_p}{2\pi}$ 이다.



(a) Extended surface roughness model



(b) Error map from simulated surface (max. error = 1.8μm)

Fig. 6 Extended surface roughness of the surface machined by ball-end mill

따라서, 볼 엔드밀 가공면의 R_{max} 는 식 (2)와 식 (3)으로 표시되는 확장된 표면 거칠기 식으로 전 가공면을 나타낼 수 있다. Fig.6 에서 제안된 확장된 표면 거칠기 모델을 도식화하였고, 표면 거칠기 시뮬레이션 결과인 Fig.3 과의 오차를 도시하였다. 최대오차는 1.8μm 이고, 매 날당 이송에서 임계 이송 경사각 부근에서 나타난다.

Fig.7 은 각 날당 이송에 대한 임계경사각을 나타낸 것으로서, 이 임계경사각을 기준으로 R_{max} 계산 식이 구분되며, 날당이송 f_t 는 0.53 f_p 부터 f_p 까지의 값에서 의미를 가진다. 본 논문에서 제시한 조건에서는 0.27mm/tooth 과 0.5mm/tooth 사이가 된다.

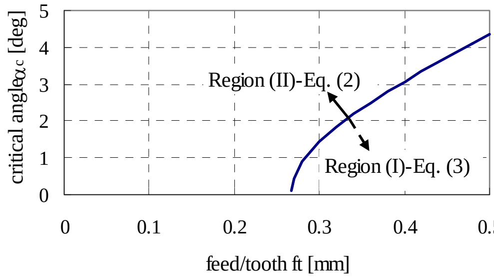


Fig. 7 Critical inclination angle according to feed per tooth

3. 표면 조건을 만족하는 NURBS 보간

3.1 표면 거칠기를 제한하는 이송속도 최적화

곡면의 거칠기를 제어할 수 있는 특별한 실시간 곡선 보간 알고리즘을 구현하기 위하여 공구 경로 정보로부터 이송 명령을 생성할 수 있는 간단한 지배방정식이 요구된다. 즉, CAM 시스템으로부터 공구 반경과 픽피드 같은 기본적인 공정 변수가 지정되고, 추가로 목표 거칠기가 설정된다면 보간기에서 이송방향의 경사각을 입력받아 이송명령을 출력하게 되는 것이다. 2 장에서 제안된 이송 경사각에 따른 2 가지 형태의 표면 거칠기 모델을 적용하면 밀링 가공면의 거칠기를 제어할 수 있는 이송량은 식 (5)와 (6)에 의하여 결정될 수 있다.

$$f_t = \frac{f_p}{2\pi} + \sqrt{8r \cdot R_{max} - f_p^{\,2}} \qquad |\alpha| > \alpha_c \qquad (5)$$

$$f_t = \sqrt{(r\sin\alpha)^2 + 2r \cdot R_{max} - R_{max}^{\,2}} \qquad |\alpha| \le \alpha_c \qquad (6)$$

공구경로의 이송경사각이 현재의 날당 이송에서 임계경사각보다 클 때, 경험적으로 모델의 오차가 최소화 되도록 경사각이 $2\alpha_c$ 일 때의 위상 차로 계산하였다. 또한, 목표 거칠기는 이송방향과 이송의 직각방향에서의 거칠기가 같아지는 두 방향 등방면 (isotropic surface)의 최종 표면 거칠기로 추천하였다. 이러한 조건이 가공시간과 사상에 소요되는 시간을 줄이는데 유리하기 때문이다.

Fig.8 은 볼 엔드 밀로 실린더 형상을 상향/하향 밀링 가공할 때 이송경사각에 따른 날당 이송과 표면 거칠기와의 관계를 나타낸 것이다. 고정

된 이송으로 가공하면 표면 거칠기가 공구 정점이 가공에 참여한 부분에서 최고 2 배정도 악화됨을 알 수 있다. 그러나, 본 연구에서 제시한 변동이송을 적용하면 전 가공면에 걸쳐서 동일한 표면 거칠기를 얻을 수 있다. 날당 이송을 감소시키는 방법에는 주축 회전수를 증가시키거나, 이송속도를 감소시키는 방법이 있지만, 주축 회전수는 일단 가공을 시작하면 바꾸는 것이 용이하지 않고 가공 시스템의 동특성을 변경시키므로 고정하고, 이송속도를 적절히 조절하는 것이 바람직하다. 따라서, 곡면을 곡선 보간을 이용하여 가공할 때 균일한 가공 표면 거칠기를 얻기 위하여 보간 단계에서 최적이송명령을 생성할 필요가 있다. 또한, NURBS 곡선 보간에서는 하나의 NURBS 블록에 하나의 이송속도가 추천되므로 매 순간의 이송속도는 상황에 맞게 적절히 조정할 수 있어야 한다.

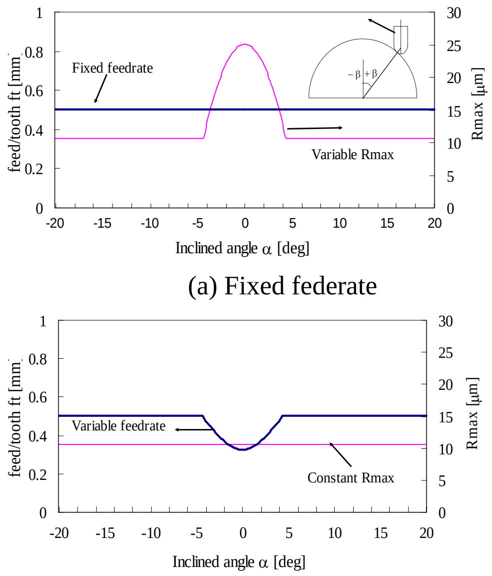


Fig. 8 Relationship between the feed per tooth and the roughness

3.2 NURBS 곡선 보간

3 차원 매개변수 곡선은 일반적으로 $P(u) = [x(u) \quad y(u) \quad z(u)]$으로 나타낼 수 있으며, 현재의 곡선상의 위치에서 다음 위치를 찾기 위하여 원하는 증분 거리 (Δs_d)를 *FT/60*(μm)으로 계산한다. 여기서 *F* 는 파트 프로그램에서 지정된 것이거나 최적화된 이송속도(mm/min) 이고, T 는 보간주기(msec)이다. 거리 증분량에 해당하는 곡선 파라미터의 증분량 (Δu)을 구하기 위하여 고차항을 제거한 Taylor 시리즈로 근사한 식(7)을 사용하여 보간주기 마다 회귀적으로 구할 수 있다[4-6].

$$u_{i+1} = u_I + \frac{\Delta s_d}{|\dot{P}(u)|} - \frac{\Delta s_d^{\,2}\left(|\dot{P}(u)|\cdot|\ddot{P}(u)|\right)}{2|\dot{P}(u)|^4} \qquad (7)$$

여기서, $\dot{P}(u) = \frac{dP(u)}{du}$ 이고, $\ddot{P}(u) = \frac{d^2P(u)}{du^2}$ 이다.

목표 표면 거칠기를 얻기 위한 거리 증분량은 두 날을 가진 볼 엔드 밀의 경우에 $2Sf_tT/60$(μm)으로 구할 수 있다. 여기서 f_t 는 식 (5) 또는 (6)으로부터 구해진다.

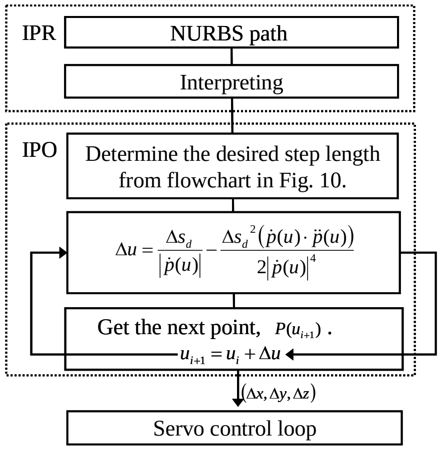


Fig. 9 Layout of the proposed curve interpolator

Fig.9 는 본 연구에서 구현한 특별한 이송속도 명령을 생성할 수 있는 NURBS 보간 알고리즘 흐름도를 나타내었다. 제안된 보간기는 크게 해석기(IPR)와 보간기(IPO), 두 부분으로 구분된다. 해석기에서는 기본적인 코드 문법해석을 수행하고 보간기에서는 보간 오차 검사, 가감속 조정, 그리고 이송 최적화 기능이 포함된다.

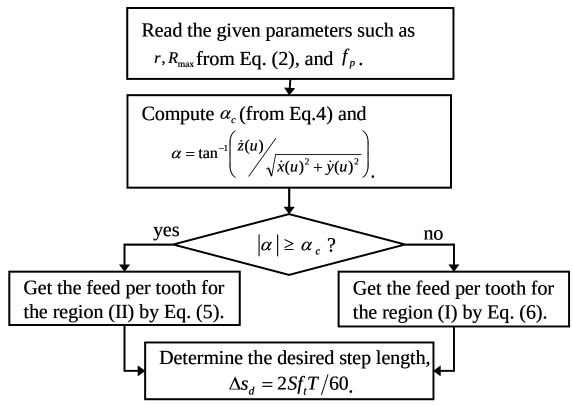


Fig. 10 Flowchart for getting a set of step length based on the target roughness

이송 최적화는 목표 표면 거칠기를 달성하기 위하여 Fig.10 의 과정을 거쳐서 수행되며 요약하면 다음과 같다.

1. 먼저, 파트 프로그램으로부터 공구반경, 픽피드,

그리고 목표 표면 거칠기 같은 고정 인자를 읽어 들인다.

2. 공구경로 정보로부터 현재의 위치에서의 이송경사각과 임계경사각을 계산한다.
3. 식 (5) 또는 (6)을 적용하여 목표 거칠기를 만족하는 거리 증분량을 얻는다.
4. 식 (7)과 NURBS 곡선 방정식으로부터 다음 보간점을 계산한다.
5 마지막으로, 서보 제어 루틴으로 전달될 이송명령을 생성한다

4. 제안된 보간기의 평가

4.1 보간기의 적용

제안된 보간 알고리즘은 PC-NC 로 재구성된 밀링 머신에 이식되었고, 윈도우 NT 기반에 실시간 처리를 보장하기 위하여 RTX (VentureCom Co.)를 사용하였으며, 보간 주기를 4msec 로 설정하고, 실가공을 다음 가공조건에서 수행하였다. 공구반경 5mm, 픽피드 0.5mm/tooth, 그리고 피삭재는 Al2024 이다.

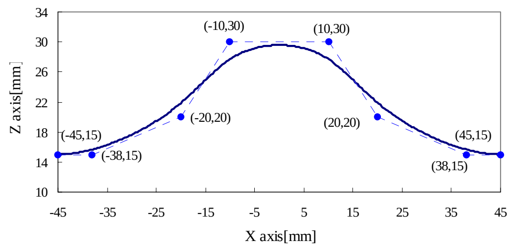


Fig. 11 An example of NURBS tool path designed for upward and downward milling (knot vector [0 0 0 0 0.2 0.4 0.6 0.8 1 1 1 1])

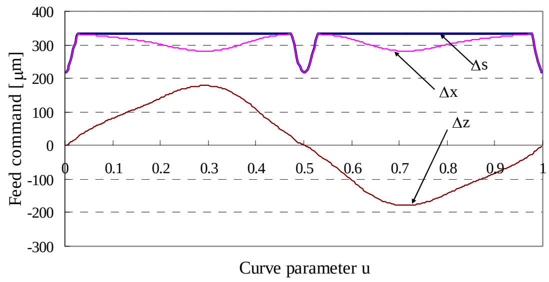


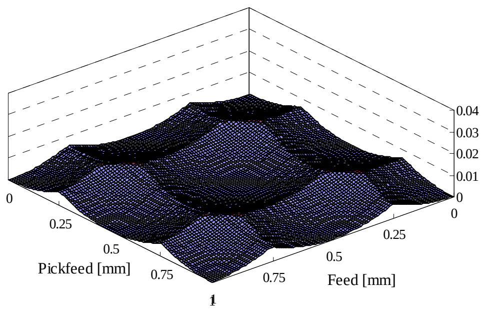
Fig. 12 Feed command controlled by proposed algorithm on a NURBS tool path

보간기의 성능을 평가하기 위하여 Fig.11 에 보이는 3 차의 NURBS 곡선 예제를 선정하였다. 먼저 하나의 NURBS 곡선 경로에 대하여 보간을 한 다음 이송속도 프로파일을 구하여 Fig.12 에 나타내었다. 곡선 파라미터 0.5 부근에서 감속되는데 이는 공구정점이 가공에 참여하는 구간이어서 거칠기 요구조건을 만족하기 위하여 감속하는 것이고, 임계경사각은 4.3° 이다. 이송명령은 이 범위 내에서 원래의 이송속도의 65%까지 감속됨을 볼 수 있다. 이러한 이송경사각에 의존하는 변동이송이 가공품의 표면을 지정된 표면 거칠기로 유지할 수 있다.

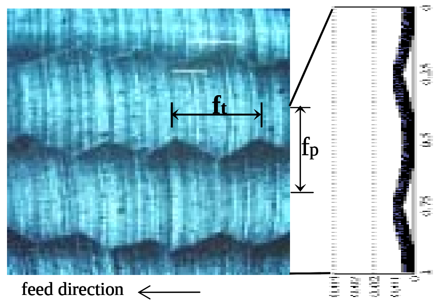
4.2 실험 결과 및 고찰

제시된 알고리즘을 적용한 경우의 가공면을 확인하기 위하여 Z-map 가공 시뮬레이션과 실가공면의 사진을 관찰하였다.

먼저, 이송경사각이 10° 일 때 가공면의 형상은 Fig.13 과 같이 격자모양의 패턴을 나타내고 시뮬레이션 결과와 유사하게 보인다. R_{max} 는 커습 높이와 커터마크 높이의 합으로 나타낼 수 있으며, Fig.13(a)의 가공면 Z-map 시뮬레이션의 결과로부터 10.7μm 임을 알 수 있고, 이 값은 표면 거칠기 모델인 식 (2)의 결과와 거의 일치한다. 식(2)는 공구가 회전운동과 병진운동을 동시에 수행하면서 공구 인선과의 상대운동으로 재료를 제거하는 메커니즘을 잘 표현하고 있음을 알 수 있다. 여기서, 목표 표면 거칠기는 10.7μm 이므로 이송속도 조절이 요구되지 않는다.



(a) Simulated surface (R_{max}=10.7μm)

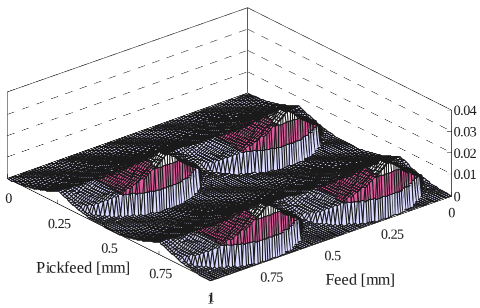


(b) Actual machined surface

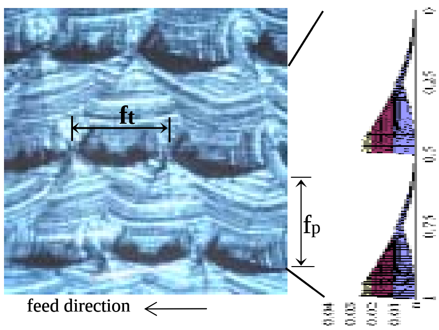
Fig. 13 Machined surface when α=10° and f_t/f_p =1

Fig.14 는 이송 경사각이 0° 일 때 고정된 이송속

도로 가공했을 때의 가공면이다. 공구 중심이 지나가는 자리에 돌출된 절삭잔량이 남아 있음을 볼 수 있고, 이 높이가 목표 거칠기의 2 배 이상이다. 실 가공면에서도 이러한 돌출된 부분이 관찰된다. 이 현상은 가공면의 Z-map 시뮬레이션으로부터 알 수 있듯이 공구정점 부근의 인선이 회전속도보다 이송속도가 크게 되어 인선이 지나가지 않는 공간이 생기는데 이것이 가공물에 그대로 남아서 절삭잔량을 형성하게 된다. 실제 가공에서는 이 영역에서의 절삭속도(공구인선과 공작물의 상대속도)가 거의 0 에 근접하여 절삭현상이 아니라 러빙(rubbing) 같은 소성변형이 일어난다.



(a) Simulated surface (R_{max}=24.9μm)

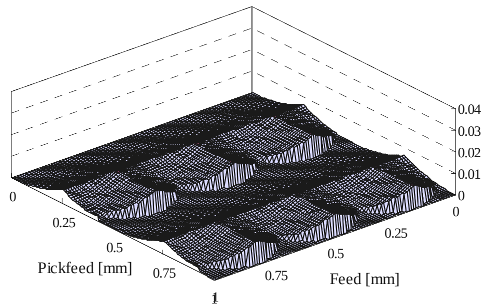


(b) Actual machined surface

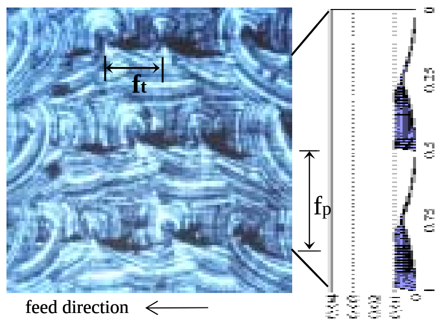
Fig. 14 Surface by the fixed feedrate when α=0° and f_t/f_p=1

정삭 가공면에서 이러한 중심부의 돌출부 생성을 억제하고 목표 거칠기를 얻기 위하여 식 (6)을 이용하여 경사각에 따라서 날당 이송을 적절히 줄여야 한다. 이를 적용하여 가공한 가공면을 Fig.15 에 나타내었다. 이송경사각 0° 에서 R_{max} 를 10.2μm 로 줄일 수 있었고, 이 때의 날당 이송은 0.33mm 에 해당한다. 따라서 가공시간을 약간 증가시키고, 원하는 가공면을 보장할 수 있게 되었다. 이송경사각에 따라서 매 샘플링 시간 마다 최적의 이송을 자동적으로 계산하는 변동이송 보간 기법은 곡면 가공에서 가공면의 품위와 가공 효율 측면에서 모두 최선의 가공조건이 된다.

Fig.16 은 가공 표면형상을 형상 측정기(Marsurf, Mahr 사)로 측정하여 보여준 것이다. 측정된 R_{max} 는 가공 시뮬레이션에 의해 계산된 R_{max} 보다 작은 값으로 나타났다. 고정 이송일 때와 변동 이송일 때 각각 17.4μm 와 9.3μm 이다. 이것은 촉침 타입의 측정기의 측정 오차와 돌출부의 날카로운 에지 부분이 러빙에 의하여 무뎌진 것으로 생각된다. 결국, 전체 표면의 목표 거칠기는 제안된 보간 기법으로 약 2μm 의 오차 범위 이내로 달성될 수 있었다.



(a) Simulated surface (R_{max}=10.2μm)



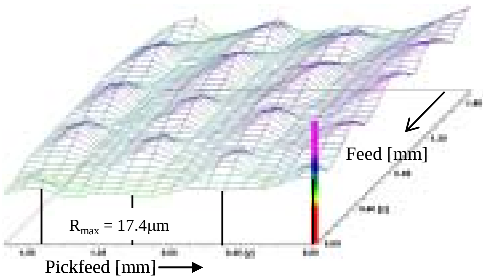
(b) Actual machined surface

Fig. 15 Surface controlled by the variable feedrate when α=0° and f_t/f_p =0.65

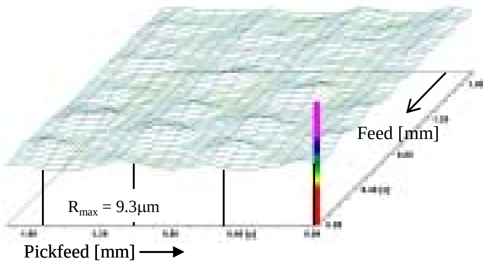
5. 결 론

본 연구에서는 표면 거칠기 요구조건을 만족하는 변동이송 NURBS 보간 기법을 제안하였다. 특히, 고이송 가공에서 공구 정점부근의 인선이 가공면에 남기는 특이 돌출부를 효과적으로 대처할 수 있음을 보였다. 이를 위하여 확장된 표면 거칠기 모델을 기하학적인 인자로부터 유도하였고, 이를 PC-NC 기반에서 NURBS 곡선 보간 알고리즘에 적용하였다. 제안된 확장된 표면 거칠기 모델은 이송 경사각의 정보만으로 표면 거칠기와 이송속도 사이의 관계를 정하므로 실시간 곡선 보간에 응용하는데 무리가 없었으며, 목표 표면 거칠기를 충분히 달성할 수 있었다. 이러한,

이송경사각에 따른 변동이송 곡선보간 기법은 미리 지정된 목표 거칠기를 균일하게 유지하므로 정삭 가공에 유효하며, 곡면을 가진 부품의 표면 거칠기를 제어할 수 있을 것이다.



(a) Uncontrolled feedrate



(b) Variable feedrate

Fig. 16 Surface topology measured when $\alpha=0^o$

참고문헌

(1) J. J. Chou and D. C. H. Yang, 1991, "Command generation for three axis CNC machining," Journal of Engineering for Industry, Trans. of the ASME, Vol. 113, pp. 305-310.
(2) J. J. Chou and D. C. H. Yang, 1992, "On the generation of coordinated motion of five-axis CNC/CMM machine," Journal of Engineering for Industry, Trans. of the ASME, Vol. 114, pp. 15-22.
(3) D. C. H. Yang and J. J. Chou, 1994, "Automatic generation of piecewise constant speed motion with smooth transition for multi-axis machines," Journal of Mechanical Design, Trans. of the ASME, Vol. 116, pp. 581-586.
(4) C. C. Lo, 1997, "Feedback interpolators for CNC machine tools," Journal of Manufacturing Science and Engineering, Trans. of the ASME, Vol. 119, pp. 587-592.
(5) S. S. Yeh and P. L. Hsu, 1999, "The speed-controlled interpolator for machining parametric curves," Computer-Aided Design, Vol. 31, pp. 349-357.
(6) S. S. Yeh and and P. L. Hsu, 2002, "Adaptive-feedrate interpolation for parameteric curves with a confined chord error," Computer-Aided Design, Vol. 34, pp. 229-237.
(7) C. C. Lo, 1998, "A new approach to CNC tool path generation," Computer-Aided Design, Vol. 30, No.8, pp. 649-655.
(8) C. N. Chu, S. Y. Kim, B. H. Kim and J. M. Lee, 1997, "Feedrate optimization of ball end milling considering local shape features," Annals of CIRP, Vol. 46, pp. 433-436.
(9) R. T. Farouki, J. Manjunathaiah, D. Nicholas, G. F. Yuan and S. C. Jee, 1998, "Variable-feedrate CNC interpolators for constant material remonal rates along pythagorean-hodograph curves," Computer-Aided Design, Vol. 30, No. 8, pp. 631-640.
(10) R. Baptista and J. F. Antune, 2000, "Three and five axes milling of sculptured surface," Journal of Materials Processing Technology, 103, pp. 398-403.
(11) R. S. Lin and Y. Koren, 1996, "Efficient tool-path planning for machining free-form surface," Journal of Engineering for Industry, Trans. of the ASME, Vol. 118, pp. 20-28.
(12) B. H. Kim and C. N. Chu, 1994, "Effect of cutter mark on surface roughness and scallop height in sculptured surface machining," Computer-Aided Design, Vol. 26, No. 3, pp. 179-188.
(13) N. Koreta, T. Egawa, M. Kuroda, K. Watanabe and Y. Li, 1993, "Analysis of surface roughness generation by ball endmill machining," Japan Socity for Precision and Engineering, Vol. 59, No. 9, pp. 129-134(in Japan).
(14) K. Naito, K. Ogo, T. Konaga, T. Abe, K. Kanda and M. Matsuoka, 1994, "Development of ball end milling for fine high-efficiency finishing," International Journal of Japan Scoity for Precision and Engineering, Vol. 28, No.2, pp. 105-110.